



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Grado en Ingeniería Mecánica**

**Análisis y optimización topológica de un chasis para Formula
Student**

Autor:

Manso Agundez, Jaime

Tutor:

**Magdaleno Martín,
Jesús**

**Departamento:
Construcciones
Arquitectónicas, I.T.
y M.M.C.y Teoría de
Estructuras**

**Valladolid, junio
2019.**

Resumen

El proyecto versa sobre el diseño, análisis y optimización topológica de un chasis tubular para la competición Formula Student llevado a cabo por el equipo Vallracing, perteneciente a la Universidad de Valladolid, este chasis podrá ser utilizado en cualquiera de las categorías de la competición y servirá como apoyo y guía para futuros diseños en ediciones posteriores.

Para realizar la optimización, se empleará el software “Solidthinking Inspire” de Altair, dando especial relevancia a los casos de carga empleados y la buena definición de los mismos, que constituyen la base para obtener óptimos resultados.

Con dichos resultados diseñaremos un chasis tubular con perfiles comerciales, posteriormente analizaremos el modelo de chasis obtenido, validaremos el diseño y obtendremos un presupuesto de realización del mismo.

Palabras clave:

Chasis, Tubular, Optimización topológica, Formula Student, Análisis estructural

Abstract

The Project is about the design, analysis and optimization of a tubular chassis for Formula Student Competition in Vallracing, UVA’s Racing team, this chassis will be able to race in all FSAE’s categories and will be a guide for next designs.

To obtain the results we are looking for we will use the software “Solidthinking Inspire”, by altair, giving special attention to the load cases and the good definition of them, those are the basis to obtain a good result.

With optimization results we will design a tubular chassis and finally analyze the model, validate the design and obtain a budget for it.

Key words:

Chassis, Tubular, Topological optimization, Formula Student, Structural analysis

Índice de contenidos

Índice de contenidos	5
Índice de figuras	7
Introducción y objetivos	9
¿Qué es Formula Student?	9
Descripción del chasis	11
Objetivos	13
Estado del arte	15
Optimización topológica y diseño generativo	15
Proceso iterativo de eliminación de material	16
Empleo de Inspire	18
Diseño y optimización	23
Fases durante la optimización topológica	23
Material empleado	24
Apoyos, condiciones de contorno de movimiento	24
Malla	25
Estados de carga	26
Presentación de resultados	33
Resultado de la optimización topológica	33
Resultado de la estructura de barras	35
Análisis y validación del conjunto	39
Solución final	43
Solución del chasis obtenida	43
Presupuesto	44
Conclusiones y líneas futuras	47
Bibliografía	49
Anexo 1	
Anexo 2	

Índice de figuras

Fig 1 Participantes Formula Student edición 2013 [1]	9
Fig 2 Calificación obtenida por prueba [1]	10
Fig 3 Foto equipo Bosch	11
Fig 4 Recomendaciones normativa sobre triangulación	12
Fig 5 Dimensiones mínimas tubo según normativa	12
Fig 6 Características mínimas acero según normativa	13
Fig 7 Optimización topológica de una pedalera	15
Fig 8 Ejemplo de nodo compartido	16
Fig 9 Ejemplo de nodo inconexo	17
Fig 10 Elementos tipo CTETRA y CBRICK	17
Fig 11 Controles de forma en Inspire	18
Fig 12 Opción para designar espacio diseño	19
Fig 13 Primera optimización realizada	20
Fig 14 División del modelo sin optimizar en zonas	20
Fig 15 Optimización para el caso de carga con choque frontal	21
Fig 16 Objetivo de la optimización	23
Fig 17 Dimensiones mínimas del tubo según normativa	24
Fig 18 Ejemplo de casos de carga empleados	24
Fig 19 Modulod de análisis en Inspire	25
Fig 20 Ejemplo de un elemento tipo "CBUSH"	25
Fig 21 Caso de carga con par aplicado en los extremos.....	26
Fig 22 Caso de carga con aceleración de 25g.....	27
Fig 23 Caso de carga con vuelco.....	27
Fig 24 Caso de carga debido a paso por curva	28
Fig 25 Caso de carga de frenada pura	29
Fig 26 Caso de carga de frenada en apoyo.....	29
Fig 27 Caso de carga de aceleración en apoyo.....	30
Fig 28 Fuerzas sobre el volante empleadas	31
Fig 29 División del chasis en zonas para optimizar	33
Fig 30 Resultados de la optimización en la zona delantera	33
Fig 31 Resultados de la optimización en la zona central.....	34
Fig 32 Resultados de la optimización en la zona trasera	34
Fig 33 Resultado combinado de la optimización.....	34
Fig 34 Puntos extremos de la estructura en Catia V5	35
Fig 35 Estructura exterior del chasis	36
Fig 36 Estructura tubular con elementos unidimensionales.....	36
Fig 37 Opciones definición cilindros en CatiaV5	36
Fig 38 Estructura tubular con superficies.....	37
Fig 39 Thicksurface CatiaV5.....	37
Fig 40 Selector de perfiles en Inventor	38
Fig 41 Chasis con los perfiles comerciales seleccionados	38
Fig 42 Diferentes análisis posibles.....	39
Fig 43 Detalle de la unión entre los tubos.....	39

Fig 44 Herramientas “Bisel” y “Muesca” en Inventor	39
Fig 45 Análisis con aceleración de 25g.....	40
Fig 46 Análisis con cargas de paso por curva	40
Fig 47 Resultado tensiones en choque frontal.....	41
Fig 48 Resultado tensiones en paso por curva.....	41
Fig 49 Análisis de cargas para frenada en apoyo	42
Fig 50 Resultado desplazamientos para frenada en apoyo	42
Fig 51 Análisis sin barras posteriores	43
Fig 52 Solución final del chasis	44
Fig 53 Medición del chasis.....	44
Fig 54 Presupuesto del chasis	45

Introducción y objetivos

¿Qué es Formula Student?

Formula Student o FSAE es una competición automovilística organizada por SAE International. El reto consiste en realizar una serie de pruebas universitarias con carácter internacional, donde los estudiantes deben diseñar, fabricar y pilotar un monoplaza según las normas facilitadas por la organización. (Normas que pueden ser consultadas en el anexo 1)

Durante la competición se pretende representar una situación real en la que una empresa contrata a un equipo para diseñar, fabricar y poner a punto un monoplaza atendiendo a una serie de normas exigidas y buscando unos estándares mínimos de aceleración, frenada, estabilidad, confort de marcha, estética, peso, consumo etc.



Fig 1 Participantes Formula Student edición 2013 [1]

En las competiciones de FSAE existen diferentes categorías, donde la más destacada y con más participantes es la clase 1, siendo la clase 2 y clase 3 para equipos más recientes:

-Clase 1

Esta categoría está destinada a monoplazas terminados, con todas sus funciones operativas y que, por lo tanto, son capaces de circular. Es la categoría “reina”, la más destacable, y en ella solamente puede participar un mismo coche durante 12 meses, teniendo que realizar cambios importantes si pasado dicho plazo, se pretende presentar el prototipo en una siguiente edición del concurso. Esta normativa fomenta la innovación y el progreso de los equipos. En clase 1 se

compite obligatoriamente en todas las pruebas requeridas por la organización. Diseño, presentación, coste, aceleración, skidpad, autocross, endurance y consumo de combustible.

-Clase 2

Una categoría pensada para aquellos equipos que tengan el vehículo fabricado, pero no tiene por qué ser completo y funcional, siendo el requisito mínimo tener el chasis fabricado por completo. En esta categoría se compite en las pruebas de diseño, presentación y coste, además se permite reutilizar los diseños empleados siempre que se compita en la siguiente categoría en años posteriores (clase1).

-Clase 3

Se trata de la primera categoría a la que entran los equipos nuevos, en ella participan los equipos en fase de diseño o validación del modelo, sin tener nada fabricado. En esta clase, al igual que en la siguiente, se permite reutilizar los diseños siempre y cuando se salte a una clase superior.



Fig 2 Calificación obtenida por prueba [1]

La primera edición de FSAE se realizó en 1981 y es el evento de su categoría con mayor relevancia, superando a otros como por ejemplo Moto Student. Lo más destacable de este tipo de desafíos es lo que aportan a los estudiantes, la experiencia de trabajar en grupo, hablar con empresas del sector, diseñar piezas y estructuras que realmente van a ser fabricadas o cumplir con los plazos exigidos [2].



Fig 3 Foto equipo Bosch

El equipo Vallracing surgió en septiembre de 2018 como una iniciativa propia de los estudiantes de la E.I.I.; en la actualidad somos cerca de 50 miembros, 30 de ellos pertenecen a la escuela de ingenierías industriales y están divididos en tres equipos técnicos, que son “motor y electrónica”, “suspensión, dirección y frenos” y “chasis y aerodinámica”, siendo este último apartado el que concierne a este trabajo.

Descripción del chasis

El chasis o bastidor es la estructura encargada de dar rigidez al automóvil y posicionar los diferentes órganos necesarios para su correcto funcionamiento, tratándose de una estructura que podemos considerar rígida e indeformable a efectos prácticos. El chasis de un vehículo es el encargado de recibir todas las cargas y esfuerzos desde las ruedas, ubicar cada elemento y componente del coche donde es necesario y es uno de los elementos de seguridad más importantes de todo vehículo [3].

En el caso concreto de la competición a la que va dirigida este trabajo, la normativa permite emplear dos tipos de chasis, o bien tubular con barras de acero o un chasis monocasco.

Vallracing y sus integrantes decidieron realizar para este primer año de competición un chasis tubular, debido a su menor coste de fabricación y reparación, y a su menor complejidad tanto de diseño como de fabricación. Para chasis tubulares existen una serie de normativas de la competición que debemos acatar. (Estas normativas están disponibles para su consulta en el anexo 1)

En primer lugar, todo chasis tubular tiene que estar formado, como mínimo por la combinación de los siguientes elementos:

- Main hoop: Barra antivuelco situada justo detrás del puesto de conducción.
- Front hoop: Barra antivuelco situada sobre las piernas del piloto, en la zona cercana al volante.

-Roll hoop braces and supports: Las estructuras necesarias para dar rigidez a las barras antivuelco.

-Side impact structure: Una barra situada en posición horizontal que abarca el área entre ambas barras antivuelco. Debe estar situada mínimo a 350mm sobre el terreno.

-Front bulkhead: Estructura plana que provee de protección a la zona de los pedales, debe aguantar además el atenuador de impactos.

-Impact attenuator: Es el único objeto comercial en la lista de los imprescindibles para un chasis, se trata de una pieza de espuma que es capaz de absorber impactos, se coloca en el frontal del monoplaza.

Todo esto se debe dimensionar para cumplir que la cabeza del piloto o sus manos no puedan tener contacto con el suelo en ningún tipo de vuelco y tanto sus piernas como pies se encuentren dentro de la estructura del chasis [4].

Por otra parte, no está permitido que se realicen “malas triangulaciones” (como vemos en la figura 4), siempre que se realice una estructura triangular las barras deben confluir en un mismo punto.

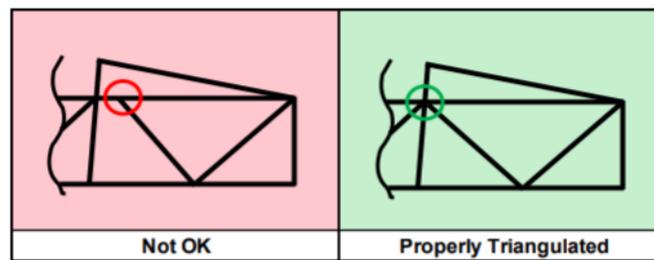


Fig 4 Recomendaciones normativa sobre triangulación

En cuanto a los materiales, la norma nos recomienda emplear aceros y nos determina las dimensiones mínimas, que son las siguientes:

Application	Outside Diameter and Wall Thickness Options
Main Hoop, Front Hoop, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch x 0.095 inch, Round 25.0 mm x 2.50 mm
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver Restraint Harness Attachment (other than Shoulder Harness Mounting Bar), (EV) Accumulator Protection Structure	Round 1.0 inch x 0.065 inch, Round 25.0 mm x 1.75 mm, Square 1.0 inch x 1.0 inch x 0.047 inch, Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports, Shoulder Harness Mounting Bar Bracing, (EV) Tractive System Component Protection	Round 1.0 inch x 0.047 inch, Round 25.0 mm x 1.5 mm
Bent Upper Side Impact Member	Round 1.375 inch x 0.047 inch Round 35.0 mm x 1.2 mm

Fig 5 Dimensiones mínimas tubo según normativa

Pudiendo emplear siempre tubos con mayor grosor o mayor diámetro exterior, pero nunca inferiores. También se puede emplear tubo cuadrado de diámetro equivalente o superior. Las características mínimas del acero a utilizar vienen igualmente registradas en la norma:

Young's Modulus (E) = 200 GPa (29.0 ksi)

Yield Strength (Sy) = 305 MPa (44.2 ksi)

Ultimate Strength (Su) = 365 MPa (52.9 ksi)

Fig 6 Características mínimas acero según normativa

Aunque se permite el uso de otros materiales, como aluminio, titanio o magnesio, en Vallracing es una opción que descartamos debido a su mayor coste de obtención, mayor dificultad de trabajo y mayor coste de fabricación, teniendo que emplear tratamientos térmicos tras finalizar las soldaduras si empleamos este tipo de materiales.

Objetivos

El principal objetivo del trabajo que nos ocupa consiste en servir de apoyo en las próximas ediciones de Formula Student para el equipo Vallracing.

Por una parte, aportando la información necesaria para poder realizar un nuevo chasis cuando sea necesario, evitando las dificultades que han ido surgiendo y facilitando los atajos y sugerencias que, sin duda, harán el proceso mucho más sencillo y rápido.

Por otra, diseñando un chasis que pueda ser empleado en cualquiera de las clases de la competición Formula Student, siempre cumpliendo las normativas, respaldado por una base teórica y un estudio que lo complemente.

Estado del arte

Optimización topológica y diseño generativo

La optimización topológica está de moda, en todos los ámbitos relacionados con la ingeniería se habla de ello, hasta tal punto que se emplea el término cuando no se debería emplear, se trata de un proceso mediante el cual podemos obtener y producir piezas y ensamblajes con mejores propiedades y de manera más sencilla [5].

El término optimización topológica se emplea desde principios de los años 90, pero no ha sido hasta ahora cuando hemos visto un mayor auge en su uso, según los expertos esto se debe, en gran parte al desarrollo de la electrónica, que permite a los algoritmos de resolución ser más rápidos y contar con mejores soluciones, aumentando el número de elementos en el diseño. Si a esto unimos que la mayoría de las piezas diseñadas de este modo no eran fabricables hasta el desarrollo de la fabricación aditiva (o impresión 3D), tenemos el cóctel perfecto que nos explica el casi nulo desarrollo de este tipo de tecnologías hasta el día de hoy, encontrándonos aún con software que están “en pañales” en comparación con las previsiones existentes.

Las principales ventajas que encontramos al emplear este tipo de tecnologías son, en primer lugar, una gran reducción del peso de las piezas, hablamos de hasta un 40% de reducción en piezas fabricadas por métodos “tradicionales” y un 70% en las piezas fabricadas mediante impresoras 3D, este ahorro de peso implica a su vez un ahorro en material, en transporte, tiempo de las operaciones de finalizado de las piezas etc. Hay que tener en cuenta además que en industrias como la del automóvil o la aeroespacial el peso es un factor fundamental, puesto que permite reducir las inercias y los consumos.



Fig 7 Optimización topológica de una pedatera

Por otra parte, nos permite transformar lo que antes eran ensamblajes en una única pieza, que, aunque tenga una geometría más compleja, será más barata de fabricar, más ligera y más resistente que el conjunto existente anteriormente, como ejemplo, Ravi Akella de Autodesk asegura que han conseguido reducir el número de piezas en una pedatera en 86 empleando optimización topológica y diseño generativo.

Sin embargo, no todo son ventajas, para poder aplicar un software de este tipo se necesitan unos altos conocimientos, los resultados obtenidos, en la gran mayoría de los casos no son de aplicación directa si no que requieren de un post procesado y comprender “por donde quiere ir el programa”. Los casos de carga y las condiciones de contorno que se emplean para la optimización son clave en el resultado obtenido, no es suficiente con ponerlo y desentenderse, hay que entenderlo y esto requiere gente con alta formación. Las compañías (como Altair) intentan evitar que la curva de aprendizaje de este tipo de software tenga una pendiente tan pronunciada, lanzando productos como Inspire, una versión simplificada y más sencilla de cara al usuario que Hyperworks.

Hay que añadir también que la potencia de cálculo necesaria para emplear estos programas es muy grande, aumentando en las piezas según aumentamos el tamaño de las mismas y la resolución de las mallas, problema que tiene fácil solución con los servicios de cálculo online que tienen las empresas que se dedican a ello.

Proceso iterativo de eliminación de material

Como hemos visto, una vez conseguimos un equipo con gran capacidad de cálculo se puede emplear el método de optimización topológica para conseguir estructuras lo más ligeras posibles eliminando iterativamente el material menos importante de la misma.

El número de puntos a eliminar por iteración es una variable que depende del número de iteraciones máximas y del área total a eliminar, por lo general un valor cercano al 1% es algo lógico [6].

Cuando están decididos los puntos a retirar se genera un archivo con las coordenadas de los puntos existentes ahora (tanto del contorno como puntos internos), esta nube de puntos es leída por el programa que dibuja la nueva geometría generada, pudiendo existir aquí dos problemas:

-Que dos contornos compartan un nodo, existiendo un algoritmo que elimina el punto en común y vuelve a calcular y dibujar la nube de puntos hasta que no existen errores. Podemos observar un ejemplo en la Fig 8.

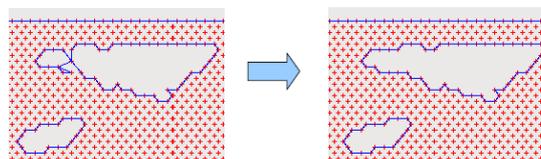


Fig 8 Ejemplo de nodo compartido

-Que queden contornos sin conexión con el contorno principal, en este caso en función del programa empleado puede emplear un algoritmo para detectarlos y eliminarlos o los representa para que sea el usuario del mismo quien decida qué hacer con ellos. Un ejemplo sería la Fig 9.

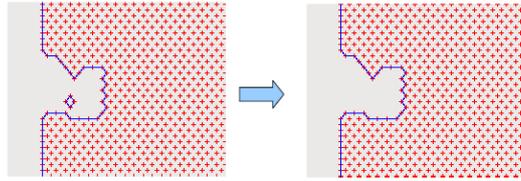


Fig 9 Ejemplo de nodo inconexo

Una vez se han completado estas posibles correcciones se vuelve a calcular el volumen de la estructura para ver si se cumple la restricción de entrada (en el caso de restricción por volumen y no por masa mínima). En caso de tener que realizar más iteraciones se guarda este archivo y se emplea como archivo de entrada para la siguiente iteración.

En todos los casos, para conocer si la estructura a optimizar es capaz de soportar las cargas dadas se realiza un análisis de elementos finitos, el cual requiere previamente un mallado. En el caso de Inspire (el programa empleado), esta malla se genera automáticamente y puede estar formada por elementos 1D, 2D o 3D, siendo estos últimos los más abundantes.

Los elementos 3D más empleados son los de tipo CTETRA, CPENTA, CBRICK o CPYRAMID, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, como veremos más tarde, en el caso concreto que nos incumbe los más empleados son los de tipo CTETRA.

Este tipo de elementos permiten el mallado automático, pero requieren de geometrías en las que no existan errores ni faltas de material; a cambio forma una malla de manera rápida y sin apenas esfuerzo, se genera un gran número de nodos y elementos, además al generarse la malla de manera automática, no tenemos control sobre la misma y no podemos “reforzarla” en las zonas más problemáticas.



Fig 10 Elementos tipo CTETRA y CBRICK

Los elementos de tipo CBRICK son también muy utilizados, a diferencia de los tetraedros no permiten mallado automático y este requiere de mucha paciencia y trabajo, los resultados con este tipo de elementos son mucho más rápidos (emplean entre un 50% y un 2% de los elementos que empleando CTETRA) debido al menor tiempo de cálculo, pero son menos comunes debido a la necesidad de mallar manualmente [7].

Empleo de Inspire

La primera etapa que realicé fue la optimización de una mangueta de suspensión a modo de práctica, evaluando las diferentes características del programa y probando diferentes configuraciones, es muy importante para lograr un buen resultado utilizar correctamente los controles de forma, compuesto por las direcciones de extrusión y las simetrías, gracias a este tipo de restricciones podemos reducir drásticamente el tiempo de cálculo.

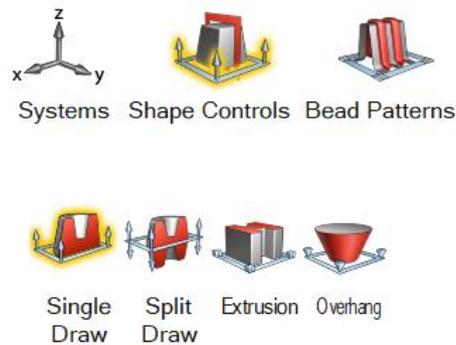


Fig 11 Controles de forma en Inspire

El primer modelo de chasis para optimizar que diseño resulta ser erróneo; debo poner los apoyos de las suspensiones en los lugares donde irán realmente, puesto que de otra manera los cálculos no tienen veracidad, para hacerlo me voy a basar en los datos de la suspensión que el equipo está realizando para este año, puesto que existirá poca variación.

La idea inicial es emplear el método de “relajación inercial”, se trata de un método numérico empleado para analizar estructuras sin necesidad de emplear apoyos, como es el caso del chasis.

Inspire divide todos los cuerpos que incluye en el programa en zonas de diseño y zonas de no diseño; denomina zonas de diseño a aquellas en las que se puede retirar material, siendo una restricción en las zonas de no diseño. La división de las diferentes zonas es una de las condiciones de contorno más importante a tener en cuenta, puesto que determina hasta qué punto damos libertad de jugar con la geometría inicial.

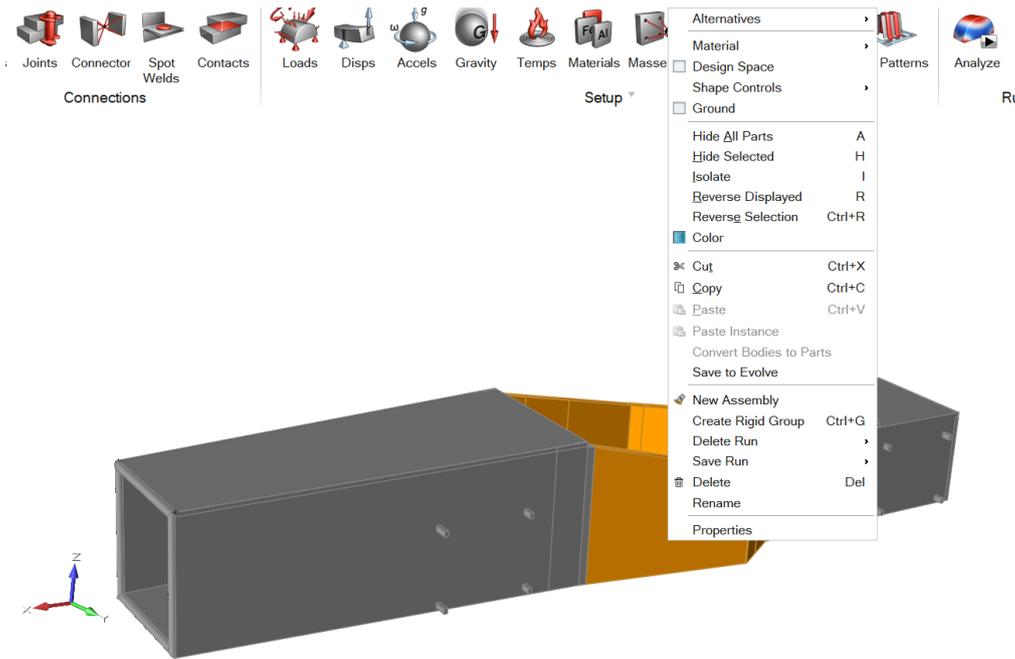


Fig 12 Opción para designar espacio diseño

Para dividir de forma correcta el espacio de diseño y el espacio de no diseño he utilizado la herramienta “cut”, separando así los cuerpos que son zonas de no diseño (apoyos para los brazos de suspensión). Seguidamente he empleado la herramienta “boolean operations” para recomponer aquellas partes que al cortar se separaron del cuerpo de diseño por error.

Aplico la condición de simetría en el plano longitudinal para simplificar los cálculos y reducir el tiempo de ejecución del programa. Aunque es cierto que no todas las cargas que se aplicarán sobre el chasis van a ser simétricas (por ejemplo, el depósito de gasolina, la batería etc) la mayoría de ellas si lo serán, pudiendo suponer, para este primer diseño, que la mejor geometría será simétrica.

El primer diseño generado no es correcto, puesto que la zona inferior de la barra antivuelco es problemática. La malla tiene problemas para cubrir la zona, esto sucede porque la geometría es irregular y con salientes, existiendo además partes del mismo cuerpo que son inconexas, por tanto, si la elimino sí que conseguimos que funcione. Es importante saber que tras cambiar la geometría desaparecen las fuerzas y los soportes que estaban aplicados sobre el modelo, estos pueden guardarse en formato “.csv” e importarlos a la próxima geometría, no perdiendo así el trabajo realizado anteriormente.

Tras realizar una primera optimización empleando el método de “relajación inercial” he obtenido un resultado erróneo, se debe a que no he tenido en cuenta el peso propio del chasis. Descarto esta opción, es más sencillo y requiere una menor cantidad de cálculos emplear apoyos

tradicionales y calcular sobre esta base. Puesto que las principales masas del monoplaza serán el piloto y el motor aplicaré apoyos en ambas zonas.



Fig 13 Primera optimización realizada

Tras realizar unas iteraciones iniciales con el modelo completo he decidido dividir el chasis en varias partes con el fin de obtener un cálculo más sencillo y asequible para ordenadores con poca potencia, puesto que estos primeros cálculos tienen una duración del orden de diez o doce horas.

Una vez dividida la estructura mediante el comando “cut”, obtengo una serie de errores y soluciones que no estoy buscando. Pruebo empleando otros comandos sugeridos por la ayuda de Inspire y doy con el fallo. El comando “cut” realiza un corte en el plano dado por el usuario; el problema es que ese plano puede atravesar zonas diferentes a las que queremos cortar, volviendo a obtener el mismo problema que con el primer diseño generado, la malla no es capaz de cubrir todo el volumen puesto que existen saltos en el cuerpo.

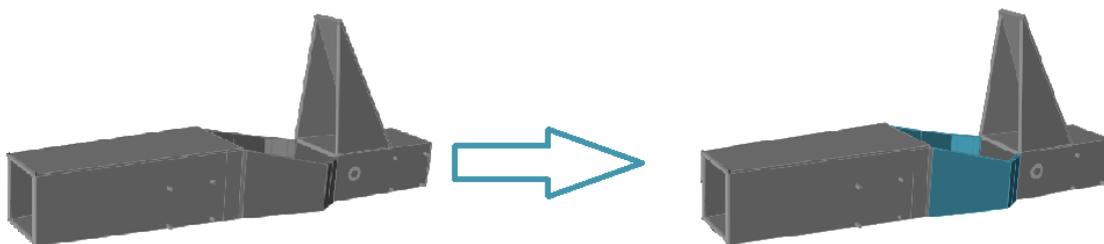


Fig 14 División del modelo sin optimizar en zonas

Este proceso de trabajo funciona sin ningún problema, podemos observar ahora que los casos de carga más exigentes “contaminan” mucho el resultado del resto de casos, así, por ejemplo, el caso de choque frontal impone mucha masa en la parte delantera del monoplaza, impidiendo observar la geometría real a aplicar en la zona, debemos, por tanto, seleccionar cuidadosamente los casos de carga a emplear en función de la geometría que buscamos.

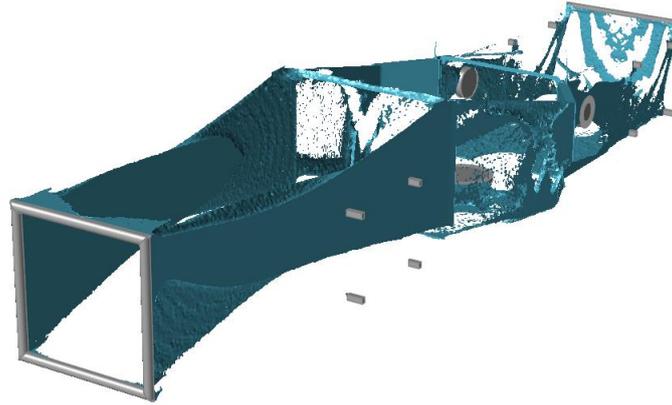


Fig 15 Optimización para el caso de carga con choque frontal

Diseño y optimización

Fases durante la optimización topológica

Las diferentes fases del proceso serán las siguientes:

En primer lugar, un diseño de la geometría con el máximo volumen que pueden ocupar las barras del chasis tubular, a mayor volumen más libertad tiene el software para eliminar masa y obtener una mejor optimización, pero mayor será el tiempo de cálculo necesario. Esta geometría se puede crear con cualquier programa que lo permita o desde el propio software de optimización (Inspire).

Tras esto hay que definir las zonas de diseño y zonas de no diseño, es decir, las zonas en las que el software de optimización topológica tiene “permitido” actuar eliminando material o no. En nuestro caso en particular, todo el modelo a excepción de los apoyos de la suspensión y el arco antivuelco es zona de diseño, aunque posteriormente debamos añadir algún elemento que la norma considera como obligatorio.

Posteriormente debemos tener en cuenta las condiciones de contorno, tanto cargas como apoyos y decidir cómo vamos a ejecutar el mallado de la estructura. El siguiente paso es realizar una validación de nuestro modelo geométrico, para lo cual podemos emplear un análisis inicial, si el software es capaz de realizar este, podemos pasar a la fase de optimización.

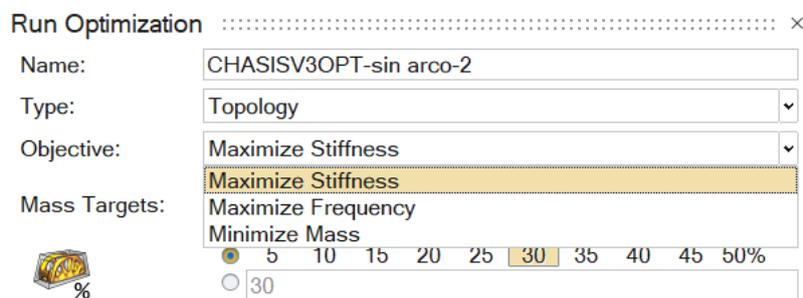


Fig 16 Objetivo de la optimización

Por último, fase de optimización: se deben indicar al programa diferentes parámetros que tiene que emplear, cobrando especial importancia el parámetro de objetivo, donde se definirá si se busca maximizar la rigidez reduciendo la masa en un porcentaje dado, minimizar la masa o alcanzar una frecuencia propia de la estructura específica. Hablaré sobre ello más adelante.

Material empleado

El material que emplearé para el chasis es uno de los definidos por la norma de la organización FSAE, en concreto serán tubos de acero AISI 316 con las dimensiones que podemos ver en la siguiente tabla:

Application	Outside Diameter and Wall Thickness Options
Main Hoop, Front Hoop, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch x 0.095 inch, Round 25.0 mm x 2.50 mm
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver Restraint Harness Attachment (other than Shoulder Harness Mounting Bar), (EV) Accumulator Protection Structure	Round 1.0 inch x 0.065 inch, Round 25.0 mm x 1.75 mm, Square 1.0 inch x 1.0 inch x 0.047 inch, Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports, Shoulder Harness Mounting Bar Bracing, (EV) Tractive System Component Protection	Round 1.0 inch x 0.047 inch, Round 25.0 mm x 1.5 mm
Bent Upper Side Impact Member	Round 1.375 inch x 0.047 inch Round 35.0 mm x 1.2 mm

Fig 17 Dimensiones mínimas del tubo según normativa

Apoyos, condiciones de contorno de movimiento

En el caso de esta optimización voy a emplear apoyos en las principales masas del monoplaça, que son: el piloto de este, con una masa aproximada de 70kg y el motor, con una masa idéntica en orden de marcha. Para el caso de carga de choque frontal se emplean apoyos en el frontal del chasis y una aceleración de 25g.

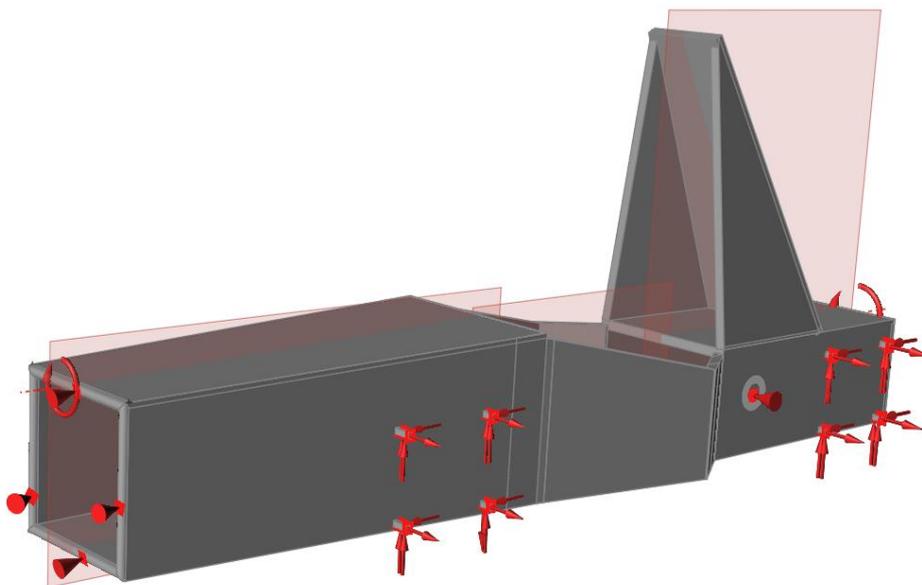


Fig 18 Ejemplo de casos de carga empleados

Si quisiéramos obtener un resultado más preciso este sería uno de los puntos donde actuar, puesto que la masa está repartida a lo largo de todo el chasis, no concentrada únicamente en la zona del motor y del piloto. Estas medidas se han tomado por que suponen un tiempo de cálculo mucho menor, sobre todo con equipos poco potentes.

Malla

En el caso concreto del software empleado, la malla se realiza de manera automática, debiendo únicamente indicar el tamaño de esta, aunque el programa nos propone un tamaño.

Hay que tener en cuenta que si la geometría creada tiene zonas “raras” el programa nos dirá que es imposible calcularlo, mostrándonos la ayuda de este la arista o cara problemática, así, por ejemplo, la geometría resultante de la colisión de dos sólidos (procedente tras recortar varios) o las superficies (sin volumen), serán causa de problemas al generar la malla.

Cuando ejecutamos el optimizador y una vez finalizado el proceso se genera una carpeta de registro en la localización que le damos al programa, por defecto en la carpeta “Documentos”. Entre estos archivos podemos encontrar “TopoOpt.out”. Si abrimos este archivo con un editor de texto podemos ver mucha información sobre cómo se ha ejecutado el programa, sobre los errores y fallos que han ocurrido y sobre la malla. (Para obtener más información sobre estos archivos pueden consultarse en el anexo 2)

La malla que ha generado para las diferentes zonas (trasera, central y delantera) comprende un número de elementos de entre 2.653.961 y 2.724.373, lo cual indica que la división efectuada está bien realizada, existiendo una diferencia de un 2.65%.

De estos elementos la gran mayoría (para el caso con 2.720.962, 2.717.790 pertenecen a este grupo, es decir, el 99.89%) son de tipo “CTETRA” (ya explicados anteriormente) los elementos restantes son del tipo “CBUSH”, elementos 1D lineales que tienen rigidez en una dirección determinada, trabajan como un muelle [8].

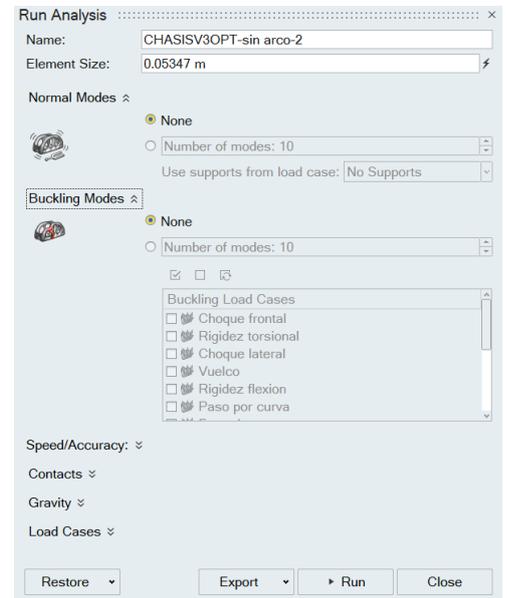


Fig 19 Modulod de análisis en Inspire

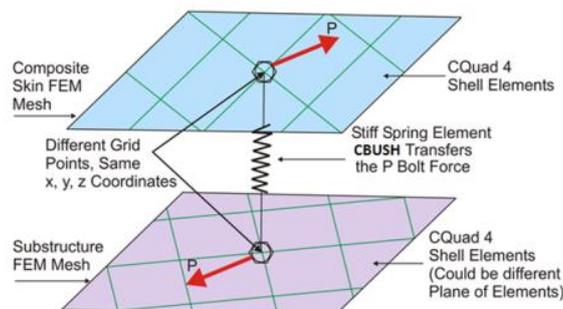


Fig 20 Ejemplo de un elemento tipo “CBUSH”

Estados de carga

Una buena definición de los estados de carga a los que se va a someter al chasis es crucial cuando queremos realizar un proceso de optimización topológica, estos definirán los esfuerzos que debe soportar el chasis, simulando la forma en la que el mismo interactúa con el entorno. El chasis de un monoplace no tiene apoyos fijos como pueda tener una estructura, si no que el contacto con el suelo es mediante los neumáticos, unidos a las manguetas, estas a los trapecios y estos al chasis. Es en la unión entre el chasis y los trapecios donde aplicaré las cargas que muestro a continuación:

Rigidez a Torsión

La rigidez a torsión es uno de los parámetros fundamentales a la hora de analizar el chasis de cualquier automóvil. Voy a aplicar dos pares contrarios en ambos extremos del monoplace de valor 1000Nm cada uno.

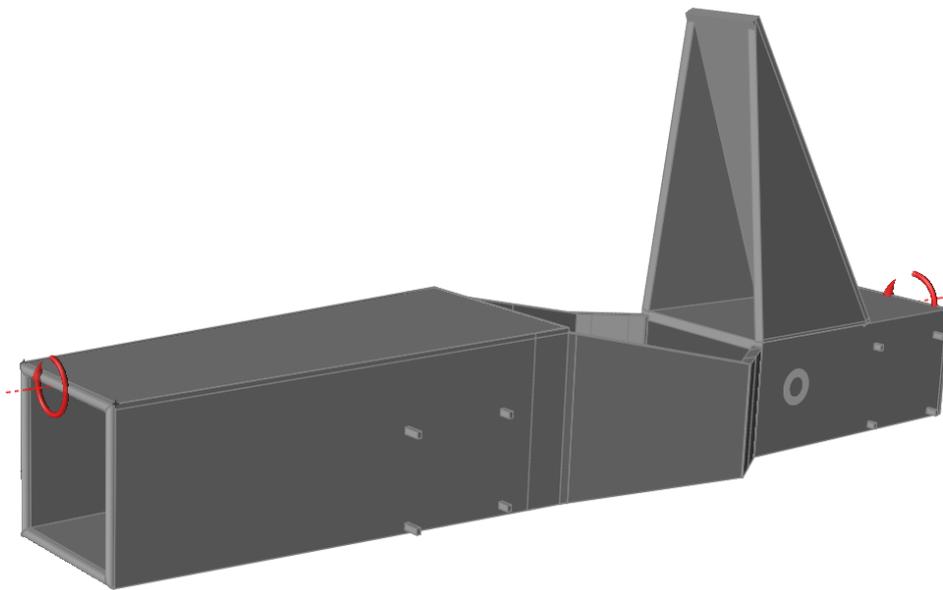


Fig 21 Caso de carga con par aplicado en los extremos

Choque frontal

Es uno de los casos de carga más críticos, viene predefinido en la norma. Aplico una aceleración de 25g a todo el chasis en dirección longitudinal, poniendo apoyos en la parte frontal del chasis, simulamos así un posible golpe frontal de la estructura con una pared.

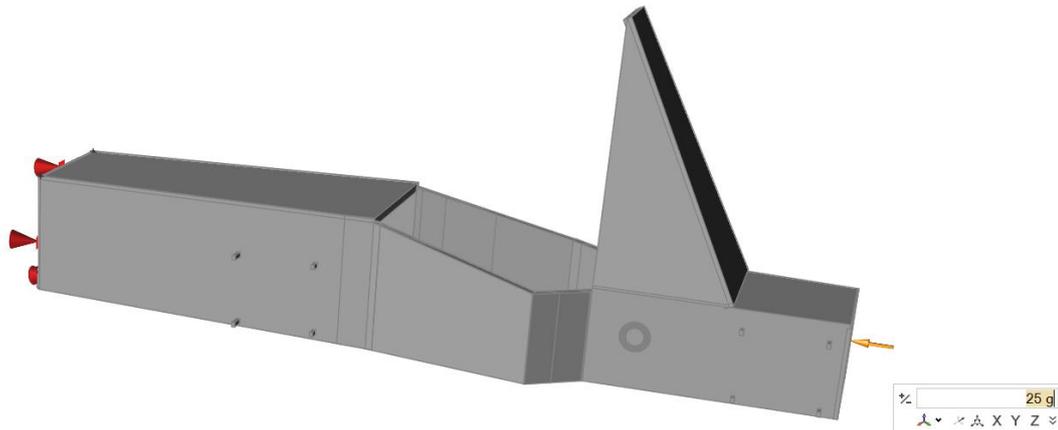


Fig 22 Caso de carga con aceleración de 25g

Vuelco

El vuelco es, junto con el choque frontal, uno de los estados de carga más preocupantes para la seguridad del piloto. Voy a aplicar una aceleración de 3g en dirección vertical y hacia arriba, y apoyos en la zona del arco antivuelco, simulando así un posible golpe sobre la zona más alta del monoplaza.

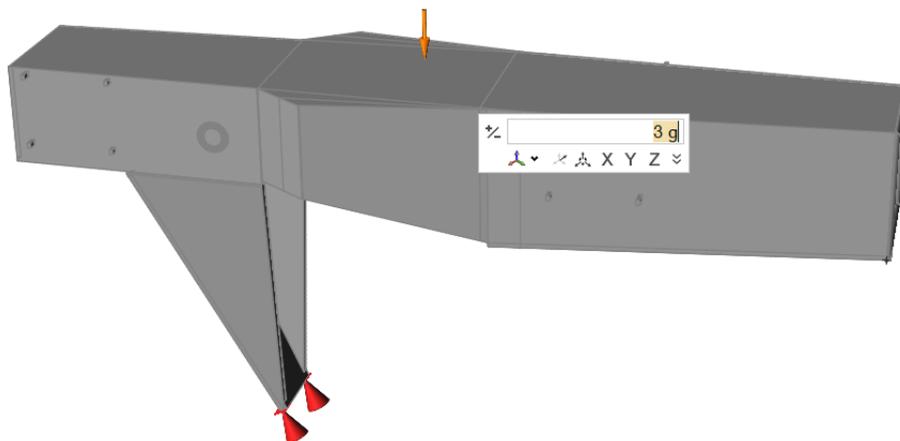


Fig 23 Caso de carga con vuelco

Choque lateral

Para este caso de carga aplicaré una aceleración en el lateral del monoplaza de 5g en dirección longitudinal y 8 en dirección perpendicular al mismo. Al aplicar la condición de simetría no será necesario aplicar esta carga a ambos lados del vehículo.

Paso por curva

Es una de las situaciones en las que más se exige al chasis. En un paso por curva existen fuerzas laterales aplicadas en las cuatro ruedas, así como fuerzas verticales que serán mayores en las ruedas exteriores a la curva que en las ruedas interiores. En nuestro caso concreto, el equipo de “Suspensión, dirección y frenos” ha calculado las cargas a aplicar.

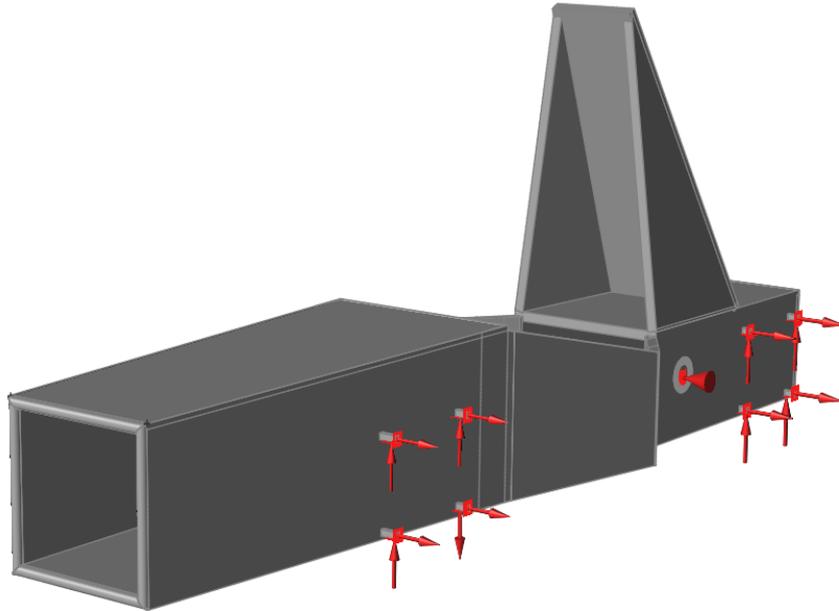


Fig 24 Caso de carga debido a paso por curva

Frenada

La frenada de un monoplaza de estas características es un caso mucho más exigente que la aceleración. Los datos facilitados por el equipo de suspensión dirección y frenos son los siguientes, fuerza vertical de valor 472N por cada rueda trasera y de 868N por cada delantera. Una fuerza de frenado en sentido longitudinal de valor 940N en cada rueda.

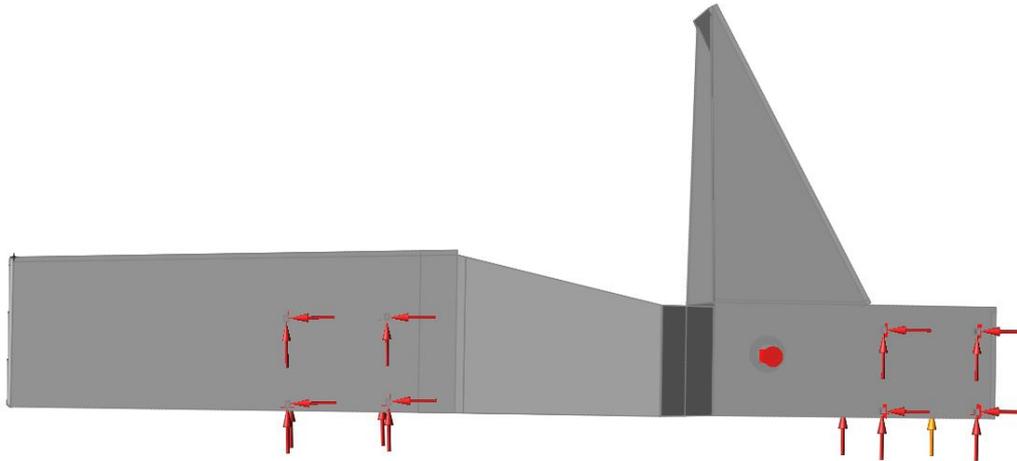


Fig 25 Caso de carga de frenada pura

Frenada en apoyo

Los casos de frenada y aceleración en apoyo son (junto a aquellos que incluyen choques) los más exigentes a los que se enfrenta el chasis de un automóvil. Combinaré las fuerzas aplicadas en el paso por curva y en frenada, a pesar de que ambas cargas no podrán darse a la vez, puesto que superaríamos el límite de adherencia del neumático.

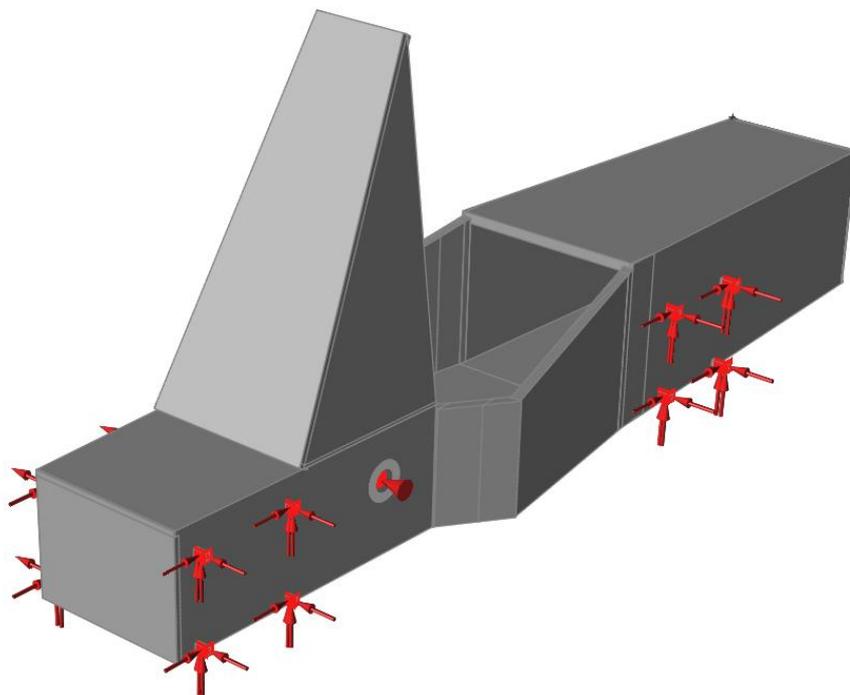


Fig 26 Caso de carga de frenada en apoyo

Aceleración

Será un caso similar al de frenado, pero cuya fuerza recae únicamente sobre la parte trasera. El módulo de esta fuerza será menor que el de las fuerzas de frenado, puesto que la capacidad de frenado de un monoplaza es siempre superior a la de aceleración.

Aceleración en apoyo

Se trata de un caso similar a la frenada en apoyo, combino las fuerzas del proceso de aceleración y el paso por curva, obteniendo así un caso de carga muy exigente.

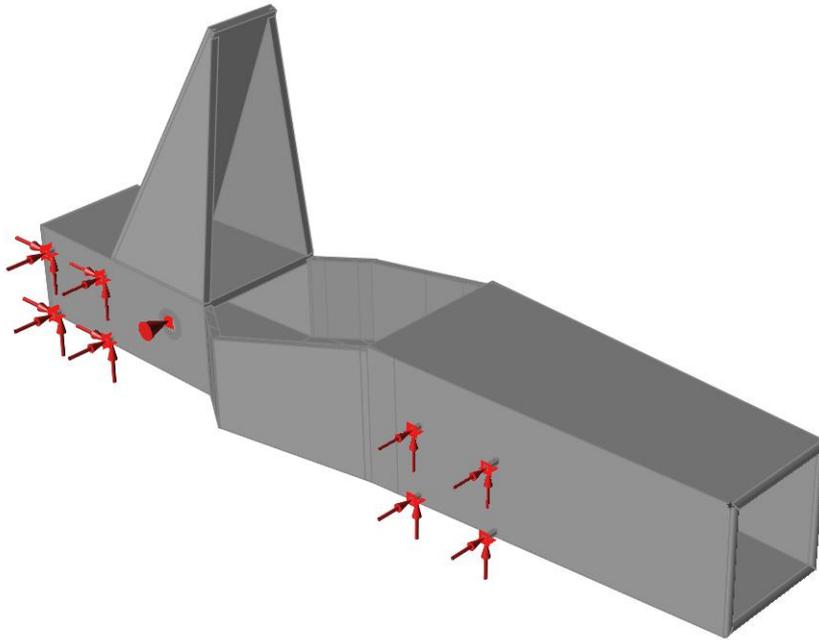


Fig 27 Caso de carga de aceleración en apoyo

Fuerza sobre el volante

La normativa de la FSAE no exige realizar cálculos sobre esta zona ni optimizarla, pero lo recomiendan. El piloto durante la conducción aplica una serie de fuerzas en las tres direcciones. En este caso voy a aplicar una fuerza de 500N en cada dirección.

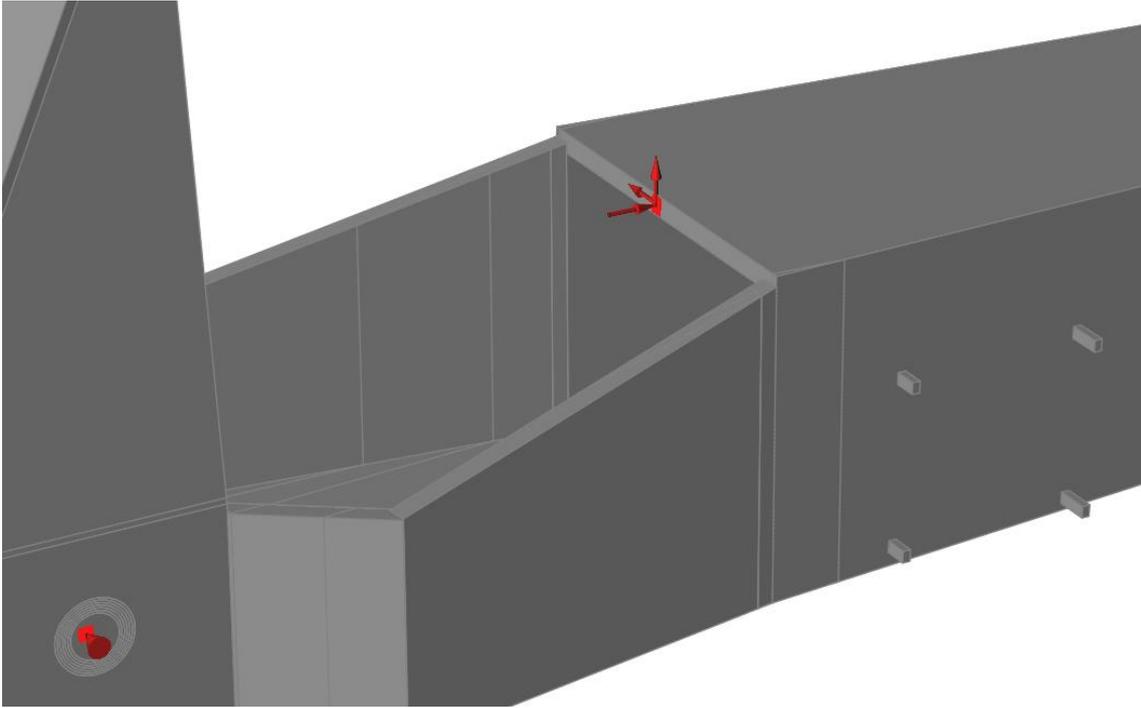


Fig 28 Fuerzas sobre el volante empleadas

Fuerza sobre el pedal

Al igual que la fuerza aplicada sobre la estructura del volante, no es una fuerza que la norma obligue, pero si lo recomiendan. Cuando el piloto frena aplica grandes fuerzas sobre el apoyo de los pedales y hay que evitar que estas fuerzas ejerzan un efecto negativo sobre el chasis. Voy a aplicar una fuerza de 500N en dirección longitudinal en la zona de los pedales.

Presentación de resultados

Resultado de la optimización topológica

Como he comentado en apartados anteriores, por motivos de tiempo de cálculo y potencia gráfica, finalmente se optó por realizar el análisis dividiendo el chasis en tres zonas que podemos observar a continuación.

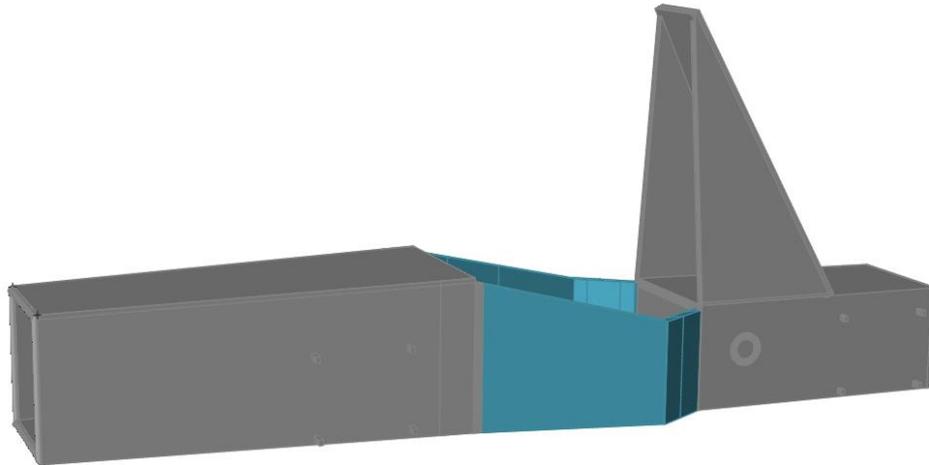


Fig 29 División del chasis en zonas para optimizar

Para la optimización he aplicado todos los estados de cargas a cada una de las zonas por separado, los resultados son, para la parte delantera:

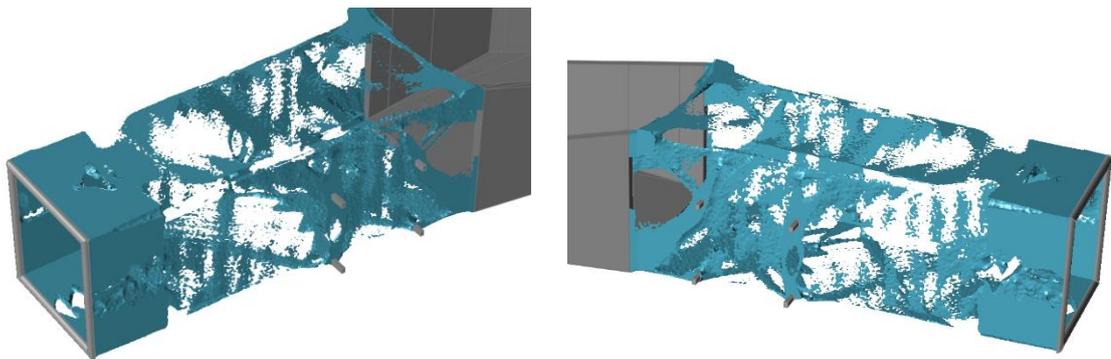


Fig 30 Resultados de la optimización en la zona delantera

En la parte central obtenemos la siguiente solución optimizada:

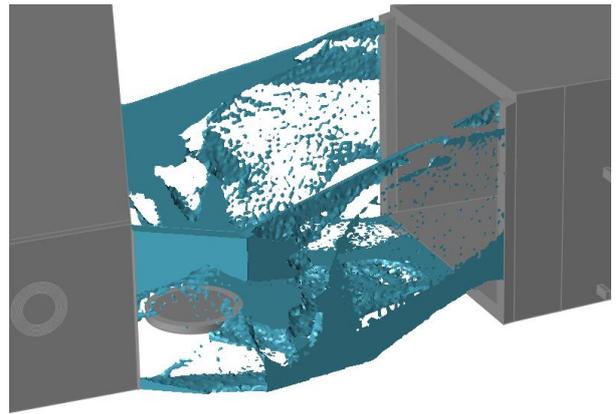
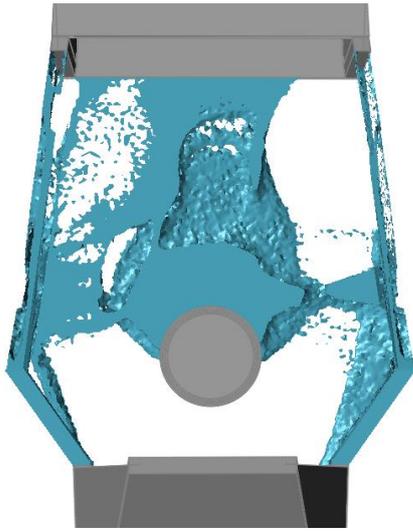


Fig 31 Resultados de la optimización en la zona central

En cuanto a la parte trasera:

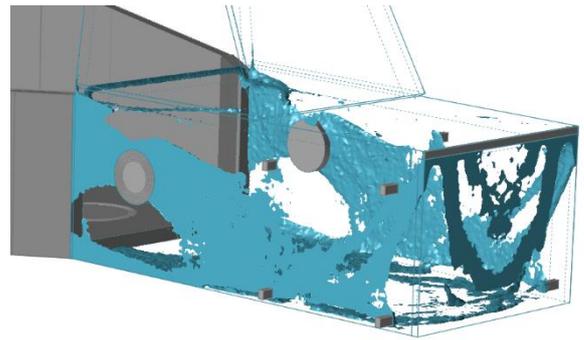
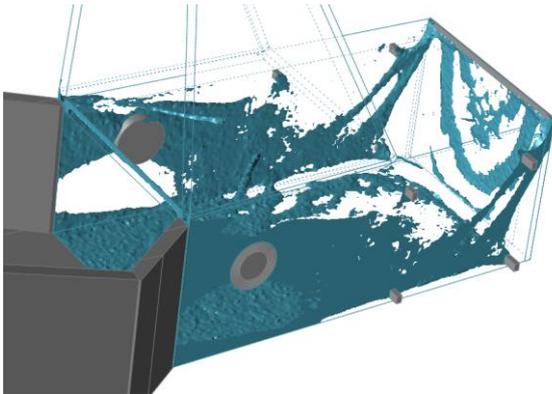


Fig 32 Resultados de la optimización en la zona trasera

Uniendo las tres partes optimizadas por separado obtenemos la siguiente estructura:

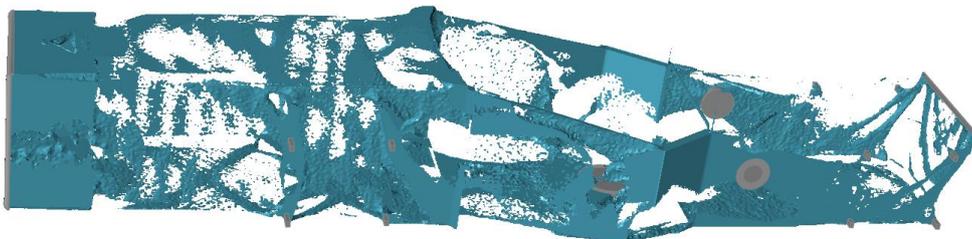


Fig 33 Resultado combinado de la optimización

A continuación, tras observar y analizar las zonas en las que se requiere más masa procedo a diseñar el chasis en un programa de CAD.

Resultado de la estructura de barras

Inspire tiene un módulo para transformar la geometría optimizada a un archivo con formato STL o STEP, sin embargo, esta opción no es interesante para el trabajo que estoy realizando, puesto que se deben emplear barras comerciales para fabricar el chasis.

Si buscáramos una geometría más compleja y que pueda ser realizada por fabricación aditiva la opción sería, sin duda, simplificar la geometría desarrollada mediante la optimización topológica empleando la herramienta “Poly nurb” que incluye Inspire y posteriormente convertir ese archivo con la geometría simplificada a uno de los formatos previamente indicados. Hay que tener en cuenta que para realizar la conversión y el posterior manejo de las geometrías en Inspire, se necesita una potencia gráfica elevada.

En este caso opté por emplear un programa CAD para generar la nueva geometría, y, posteriormente volver a Inspire y analizar el conjunto, validando así el diseño que he obtenido con el proceso de optimización. A pesar de que el propio Inspire permite generar geometría, el programa empleado para ello ha sido Catia V5, debido a que el mayor dominio del programa permite reducir el tiempo empleado para generar la misma.

El primer paso fue obtener los puntos extremos de la estructura de barras a realizar, mediante el archivo de geometría tridimensional del que parte el programa de optimización y mediante la herramienta “point” de Catia V5 es algo relativamente sencillo. Se consigue así la siguiente “nube de puntos”.

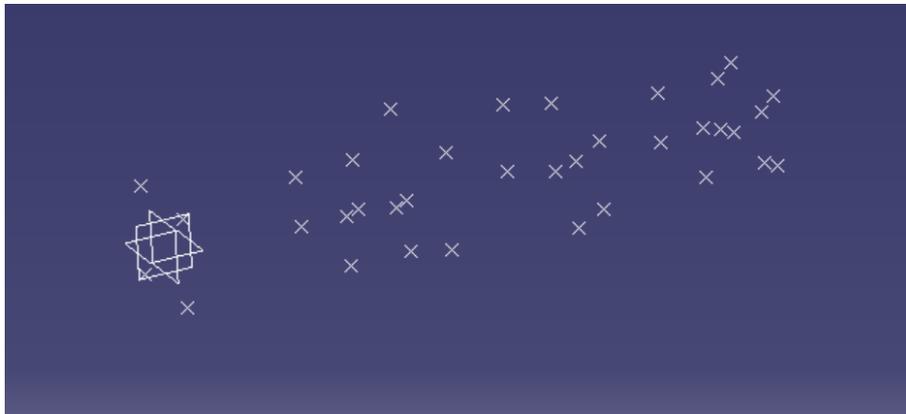


Fig 34 Puntos extremos de la estructura en Catia V5

Tras esto, comienzo a unir los puntos mediante elementos unidimensionales, generando así una estructura de barras muy sencilla en la que únicamente podemos distinguir las zonas más significativas del chasis.

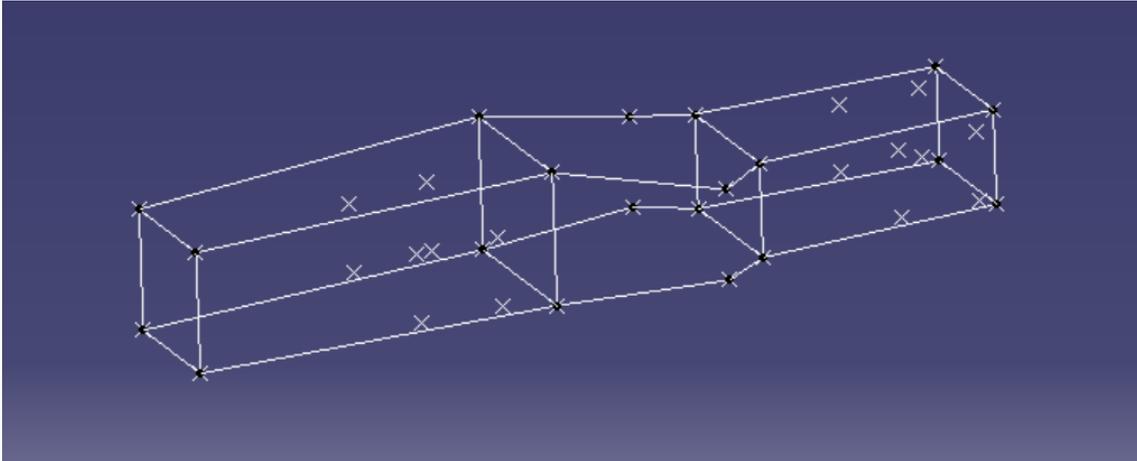


Fig 35 Estructura exterior del chasis

Posteriormente y trabajando conjuntamente con el programa CAD y el resultado obtenido en Inspire, se añaden barras en los lugares que el programa considera más críticos, y, por tanto, donde existe más material, generando así el chasis completo con elementos unidimensionales.

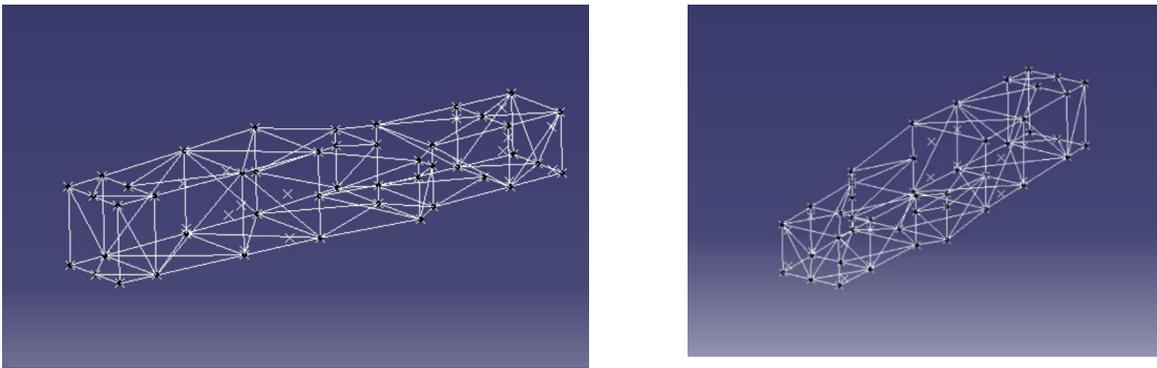


Fig 36 Estructura tubular con elementos unidimensionales

El siguiente paso es dotar de volumen a todos estos elementos que he creado, para ello se emplea el comando "Cylinder" que se encuentra en el módulo "Generative Shape Design" de Catia, en este comando se puede seleccionar ya el diámetro que tendrán los tubos que vamos a generar en vista al análisis y posterior medición. En este primer análisis voy a emplear todos los tubos idénticos, con un diámetro exterior de 25mm.

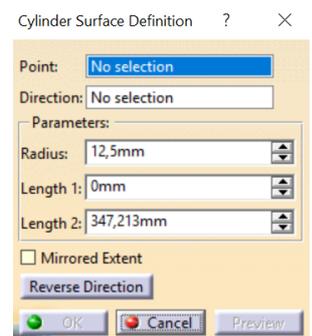


Fig 37 Opciones definición cilindros en CatiaV5

El resultado final con tubos bidimensionales es el que se muestra a continuación:

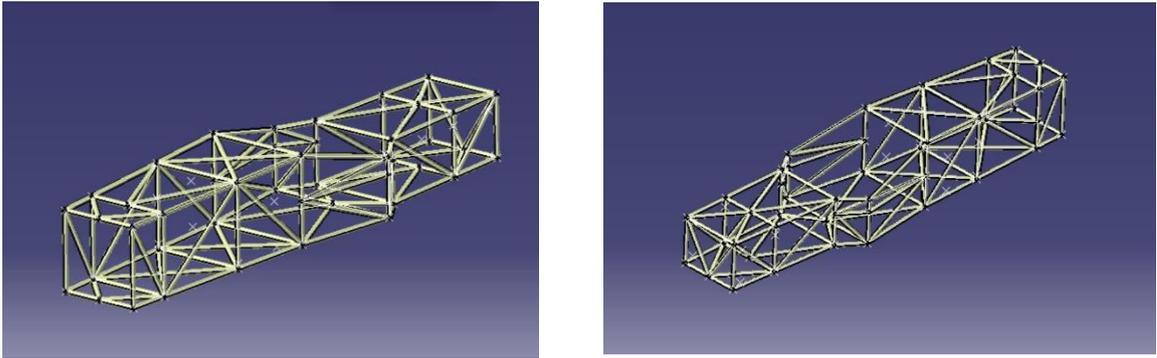


Fig 38 Estructura tubular con superficies

El último paso restante para conseguir una estructura de tubos tridimensionales es dar volumen a los mismos, para ello Catia cuenta con una herramienta que dota de pared a las superficies en el módulo “Part Design”. Como se comentó anteriormente, en este primer análisis todas las barras serán idénticas, en este caso contarán todas con un grosor de 2.5mm.

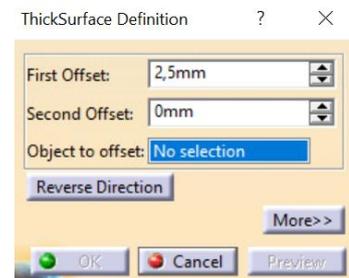


Fig 39 Thicksurface CatiaV5

Una vez obtenida la geometría lista para analizar, es necesario volver a exportarla a Inspire para añadir las condiciones de contorno. Si bien puede exportarlo, la potencia necesaria para mover una estructura tridimensional de este calibre es mucho mayor a la que tiene mi dispositivo, por lo cual hubo que buscar otras opciones para realizar este análisis.

La opción elegida para realizar este análisis fue Inventor, de AutoDesk. Para poder analizar la estructura, primero se debe exportar desde el archivo “.catpart”, para ello elijo el archivo que no tiene aún creadas las barras en tres dimensiones, si no, únicamente, elementos unidimensionales.

Una vez exportado este archivo se debe guardar y volver a abrir, pero esta vez como parte de un ensamblaje, de este modo el software entenderá la estructura como un conjunto de barras.

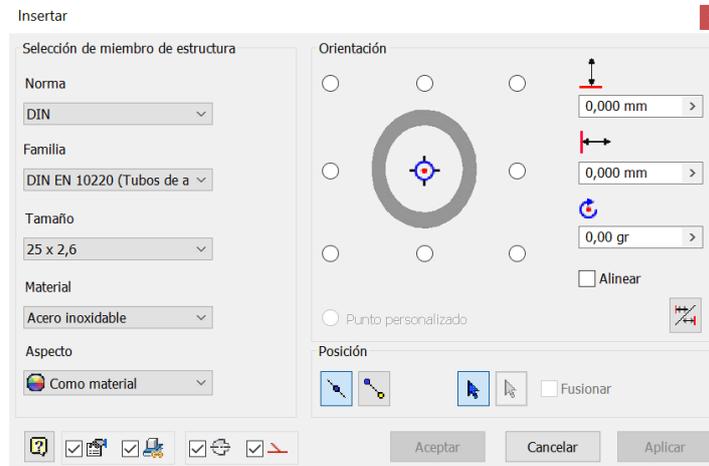


Fig 40 Selector de perfiles en Inventor

Acto seguido en la pestaña “diseño” del programa encontramos la opción insertar estructura, que nos permite generar barras con diferentes perfiles comerciales, en este caso particular elijo tubos DIN EN 10220 con dimensiones 25x2,6.

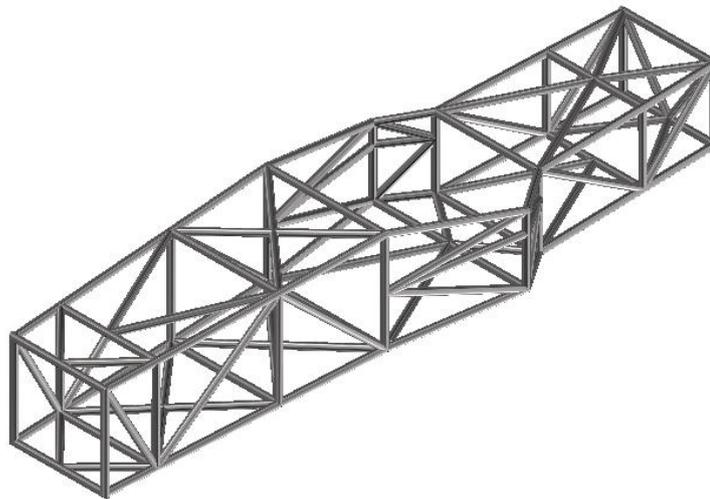


Fig 41 Chasis con los perfiles comerciales seleccionados

Inventor nos da la posibilidad de realizar análisis con elementos unidimensionales (análisis de estructura) o tridimensionales (análisis de tensión). Puesto que se está trabajando con una estructura de barras, se ha optado por seleccionar un cálculo unidimensional, en el cual se supone que los nudos son perfectamente rígidos. Si bien los resultados obtenidos no son tan exactos como los que se hubiesen podido obtener mediante un análisis de elementos tridimensionales, son lo suficientemente precisos como para considerarlos válidos.

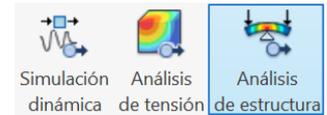


Fig 42 Diferentes análisis posibles

Cuando se genera la geometría tubular sobre la base unidimensional en inventor, las uniones tienen una forma similar a la reflejada en la figura 43. Mediante las herramientas bisel y muesca se pueden obtener uniones sin geometrías extrañas y que por tanto no darán problemas a la hora de generar la malla, aunque esto será necesario únicamente en los casos de cálculo tridimensional.

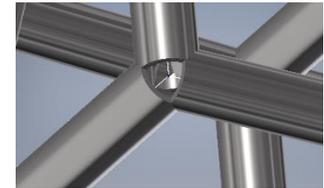


Fig 43 Detalle de la unión entre los tubos

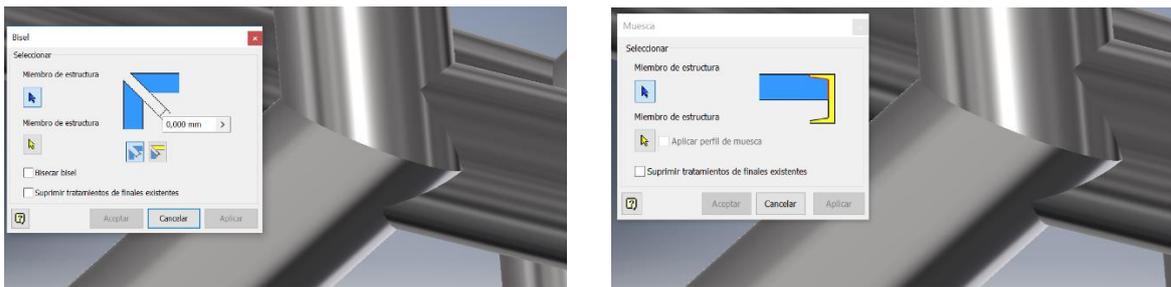


Fig 44 Herramientas "Bisel" y "Muesca" en Inventor

Una vez obtenido el modelo bien generado podemos pasar a analizarlo.

Análisis y validación del conjunto

Para realizar el análisis se debe, en primer lugar, añadir las condiciones de contorno a nuestro modelo. En este caso, estas serán las cargas que se aplican y los soportes de la estructura, siguiendo el mismo patrón que se aplicó en Inspire para la optimización topológica.

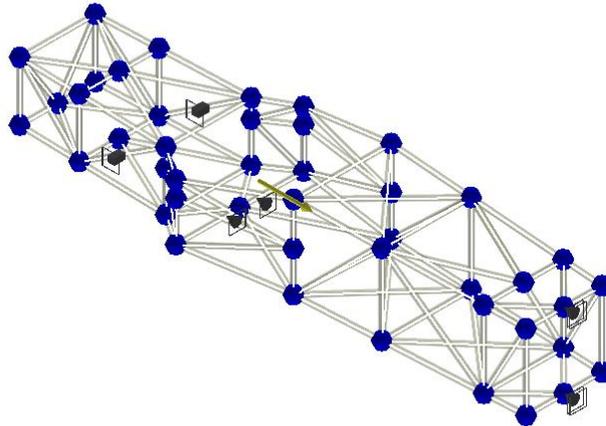


Fig 45 Análisis con aceleración de 25g

Para el caso de carga de choque frontal se aplica una aceleración a todo el modelo y el apoyo de la estructura en el frontal del monoplaza. Para el resto de los casos de carga los apoyos se sitúan en la zona donde irán las masas con mayor importancia, es decir, el asiento del piloto y los soportes del motor.

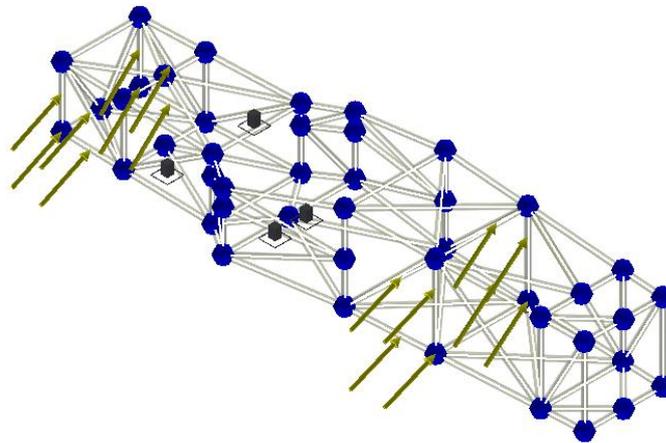


Fig 46 Análisis con cargas de paso por curva

Para una primera simulación se aplican las condiciones de contorno choque frontal. Los resultados obtenidos son correctos, el material soporta una tensión máxima de 7.82 MPa y por tanto puede afirmarse que la estructura resiste esta carga. El desplazamiento máximo es de 0.0247mm.

Tipo: Tensión normal Smax
Unidades: MPa
25/06/2019, 12:23:34

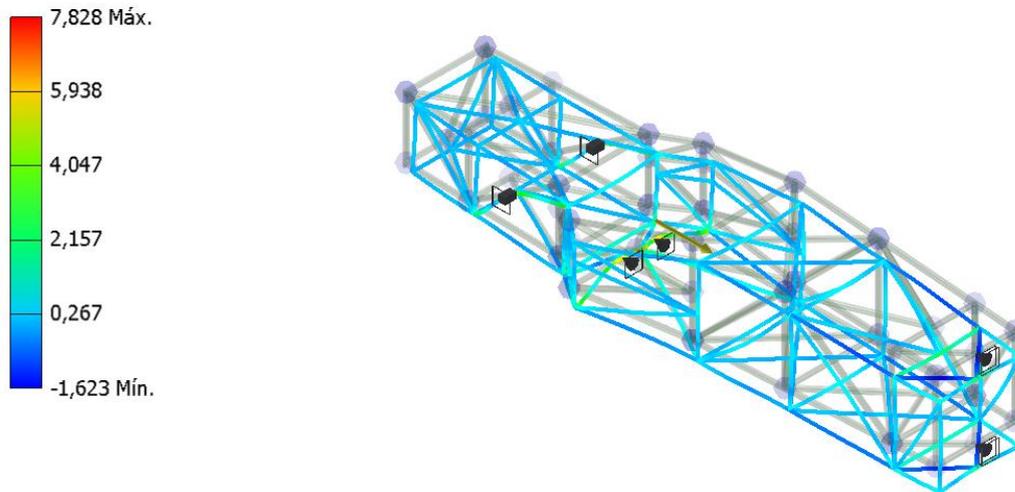


Fig 47 Resultado tensiones en choque frontal.

Para el segundo análisis voy a emplear el caso de paso por curva, en el que existen fuerzas laterales y verticales. Los resultados obtenidos son satisfactorios, logrando trabajar por debajo del límite del acero empleado. La tensión máxima que observamos es de 95.56 MPa y el desplazamiento máximo de 2.5mm.

Tipo: Tensión normal Smax
Unidades: MPa
25/06/2019, 12:26:53

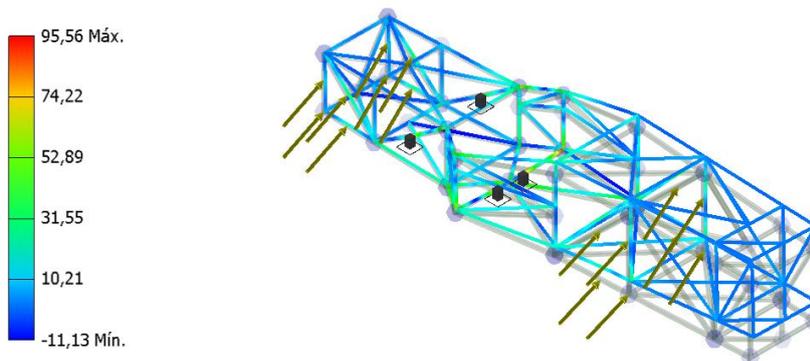


Fig 48 Resultado tensiones en paso por curva

Análisis por último uno de los casos más exigentes que podemos encontrar, se trata del caso de frenada en apoyo. Las cargas aplicadas corresponden a las de paso por curva sumando la frenada. Los resultados son correctos, obteniendo una tensión máxima de 106.9 MPa y desplazamiento máximo de 2.8mm.

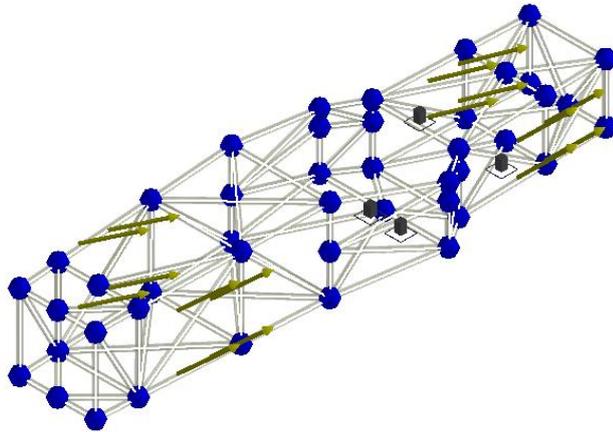


Fig 49 Análisis de cargas para frenada en apoyo

Tipo: Desplazamiento
 Unidades: mm
 25/06/2019, 12:38:58

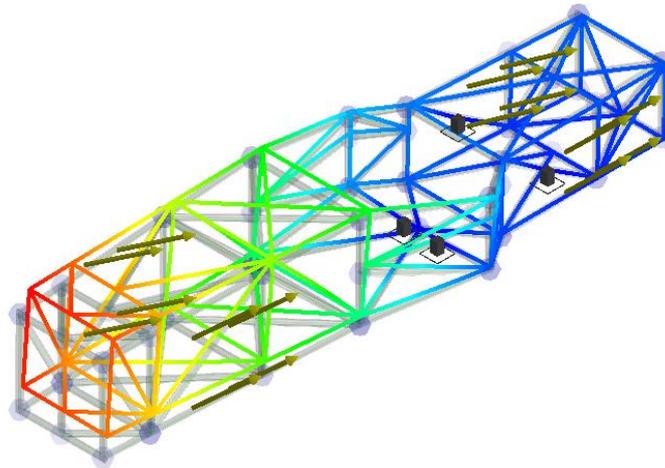
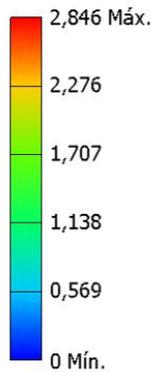


Fig 50 Resultado desplazamientos para frenada en apoyo

Se puede concluir con los resultados obtenidos, que el chasis diseñado cumple con los objetivos mínimos requeridos, aunque la norma no especifica los desplazamientos máximos que puede sufrir el chasis, observando los obtenidos en nuestro modelo, apreciamos que son pequeños, del orden de pocos milímetros en una estructura que supera los dos metros de longitud. Por otra parte, en cuanto a las tensiones, no se superan en ningún momento los límites del material. Por tanto, se puede concluir que será un chasis seguro y apto para la competición.

Solución final

Solución del chasis obtenida

A la vista de los resultados expuestos en el apartado anterior, considero que la geometría analizada es la más apropiada para la solución final. Si bien se han eliminado las barras que ocupan parte del compartimento motor por motivos de diseño, puesto que debemos ser capaces de sacar el motor en caso de avería, hemos comprobado también que, tras retirar las barras, el chasis soporta las cargas aplicadas sobre el mismo, no existiendo apenas diferencia en las tensiones máximas soportadas, como podemos observar en la Fig 51.

Tipo: Tensión normal Smax

Unidades: MPa

30/06/2019, 15:30:33

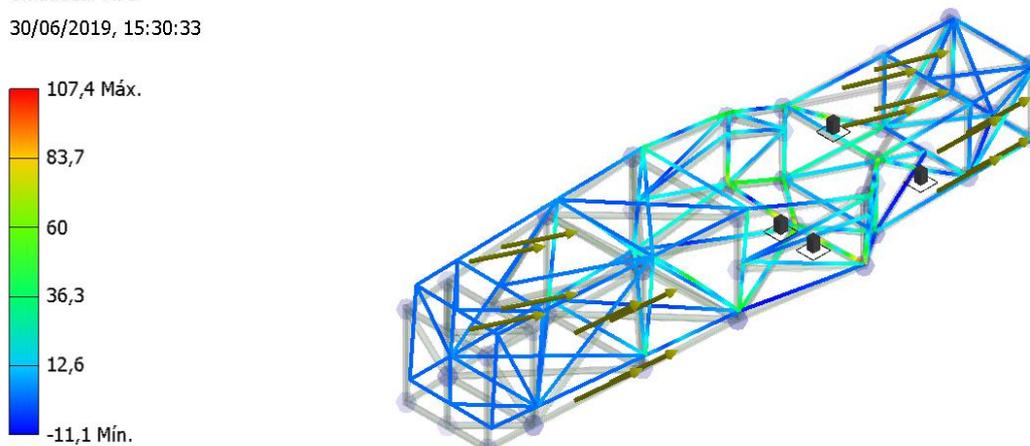


Fig 51 Análisis sin barras posteriores

Hay que tener en cuenta que, aunque en un principio el material empleado aguanta con normalidad, la norma de Formula Student sugiere que tomemos como resistencia del material en las zonas con soldadura un límite de 180 MPa, quedándonos en el último caso de carga relativamente cerca de este valor.

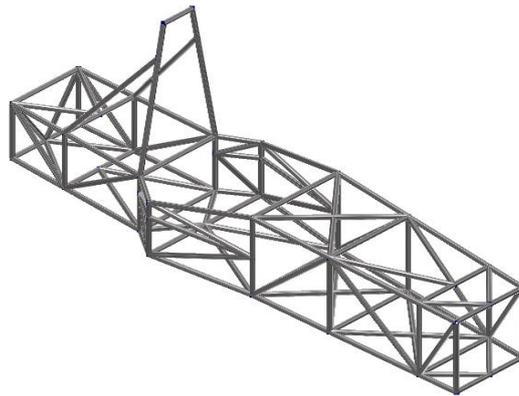


Fig 52 Solución final del chasis

Los máximos valores de tensión se dan además en las zonas de unión entre barras, pudiendo sacar como conclusión que el proceso de soldadura será crítico para obtener un chasis con las propiedades mínimas, evitando fallos al tomar una curva o tener un choque frontal o lateral.

Los procesos de soldadura son relativamente caros, sobre todo teniendo en cuenta que el material a emplear en el chasis será acero inoxidable (AISI 316). Por ello, realizar un presupuesto como una aproximación al coste total de la construcción del mismo, se torna algo imprescindible.

Presupuesto

Voy a dividir el presupuesto en dos partes que serán, por un lado, el coste total de las barras de acero y por otro la preparación de las mismas, dando los cortes y muescas correspondientes y el proceso de soldadura necesario para finalizar la construcción de la estructura.

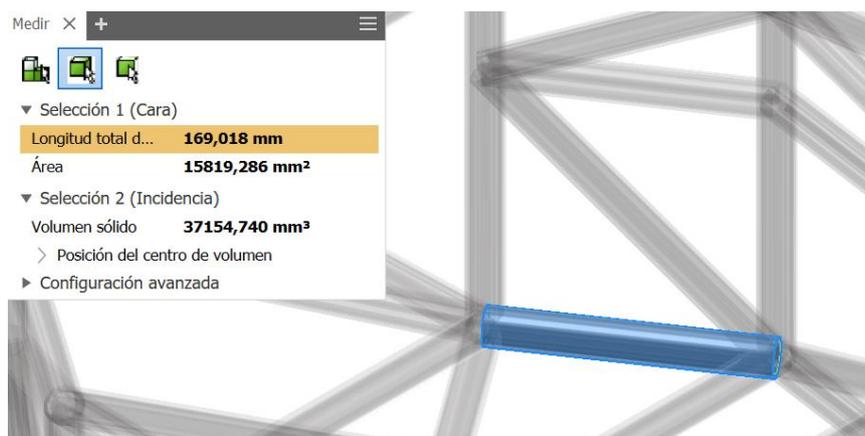


Fig 53 Medición del chasis

Comienzo realizando una medición de todas las barras implicadas en la estructura. Obtengo un total de 46.65 metros de tubo empleados. Como hay que realizar cortes y muescas el total de tubo empleado estará más cerca de los 50 metros que de la cantidad medida. Los precios en el

mercado oscilan entre 10-20€ por metro de tubo de estas características, se puede aproximar por tanto un precio de 750€ solamente en el material necesario.

Al tratarse de un material relativamente complejo de soldar y manipular voy a estimar que el precio de manipulación será el doble del coste del mismo material, puesto que los costes de soldadura van en función a la cantidad de material a soldar. Obtengo así un coste de soldadura y manipulación de 1500€.

El presupuesto final que rondará la construcción del chasis será por tanto de 2250€.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO	TOTAL
Acero AISI 316	50,00	15,00	750,00 €
Operaciones corte y soldadura	50,00	30,00	1.500,00 €
		SUB-TOTAL	2.250,00 €

Fig 54 Presupuesto del chasis

Conclusiones y líneas futuras

He obtenido un chasis válido para competir en cualquiera de las clases existentes en Formula Student, con una base teórica y un estudio detrás que permitirán apoyar y defender por qué se han tomado diferentes decisiones durante el diseño. Por otra parte, este trabajo servirá de guía en caso de tener que realizar otro diseño similar, pudiendo emplear las siguientes recomendaciones:

Para realizar un diseño mediante optimización topológica no conviene emplear geometría compleja, si no lo más sencilla posible. Si existen elementos que no se van a emplear para el cálculo de cierta zona conviene eliminarla para ese cálculo. Ejemplo de esto sería el arco antivuelco.

Un aspecto importante a recalcar, sobre todo en ordenadores con poca potencia gráfica, es que se puede dividir la estructura completa a optimizar en partes, analizar cada una por separado y posteriormente visualizar y analizar la optimización completa. La barra lateral derecha de "Inspire" permite ir alternando entre el modelo real y las diferentes optimizaciones que se realizan en cada parte del modelo creado.

Hay que tener en cuenta que a la hora de dividir la estructura existen métodos dentro del propio programa, como pueden ser la herramienta "Cut" o la herramienta "Boolean Operations" con la opción de interferencia, pero hay que tener especial cuidado con no dejar diferentes partes del mismo cuerpo separadas, puesto que después es imposible realizar el mallado.

La optimización topológica es una herramienta que permite acercarse a la forma que debe tener la estructura deseada, pero en caso de usar perfiles comerciales, el cálculo preciso debe realizarse con análisis posteriores, no siempre se va a poder fabricar la misma geometría que dicta la optimización, a no ser que la pieza sea impresa en 3D. Para adaptar la geometría a formas más fabricables se puede transferir el archivo con extensión ".stmod" propia de Inspire a otras geometrías como Step, IGS o STL, y trabajar después en programas CAD más avanzados y con más opciones.

Trabajos futuros pueden tener en cuenta que el chasis no tiene por qué ser simétrico si no que puede existir cierta diferencia, realizar un análisis tridimensional en el que se pueda observar mejor el comportamiento de las uniones entre las barras o realizar un chasis del tipo monocasco, que consigue una mayor rigidez disminuyendo el peso del conjunto a costa de una construcción más compleja y un coste de fabricación superior.

Bibliografía

- [1] ¿Qué es la Formula Student? <https://isbsport.com/que-es-la-formula-student/>-Junio 2019
- [2] “Desarrollo del Styling del vehículo Formula Student UPV” Manuel Martínez Torán, 2014
- [3]-“Funciones del chasis” <https://www.autoscout24.es/informacion/asesor/tecnologia-del-automovil/funcion-chasis/> -Mayo 2019
- [4]-Normativa Formula SAE 2019
<https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=64b861c2-980a-40fc-aa88-6a80c43a8540>
- [5]-“Generative Design and Topology Optimization: In Depth look at the two latest design technologies” (engineering.com) -Mayo 2019
- [6]-“Capítulo 4. Optimización topológica”
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128044247/nonlinear-optimization-of-vehicle-safety-structures> - Abril 2019
- [7]-“3D Meshing by Altair”- <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2014/02/3DMeshing.pdf> - Junio 2019
- [8]-2D Meshing by Altair”- <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2014/02/2Dmeshing.pdf> - Junio 2019
- [9]-“Optimización topológica de una pieza metálica para adaptarla a fabricación aditiva”
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/25313> - Mayo 2019
- [10]-“Strength-based topology optimization for anisotropic parts”
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416303475?via%3Dih> – Mayo 2019
- [11]-“Nonlinear optimization of vehicle safety structures”
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128044247/nonlinear-optimization-of-vehicle-safety-structures> - Junio 2019
- [12]-Aprendizaje Altair- <https://altairuniversity.com/learning-library/> -2019
- [13]-Foro Altair- <https://forum.altair.com/> -2019
- [14]-“Diseño y optimización de una estrella de llanta para un monoplaza de Formula Student”
José María Martín Ruiz -2016

[15]-“Diseño y optimización del chasis de un monoplaza Formula Student mediante el método de elementos finitos” Samuel Monge Francés -2017

[16]-“Diseño y optimización del chasis de un vehículo eléctrico autónomo” Carlos Martín García y Rafael Mocholí Álvarez -2016

[17]-“Diseño y optimización topológica de Rockers para un modelo de Formula Student” Cristina Silvestre Gómez -2017

[18]-“Diseño y simulación de un chasis tubular para un vehículo tipo fórmula” Roberto Redondo Martín -2017